干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

黄河流域城市化与生态系统服务价值协调性及障碍因素研究

张凯莉[1]， 冯荣荣[1]， 刘 潭[2]， 张志成[1]， 韩佳宁[1]， 刘 康[1,3]

（1. 西北大学城市与环境学院，陕西 西安 710127；2. 西北大学经济管理学院，陕西 西安 710127；
3. 陕西西安城市生态系统定位观测研究站，陕西 西安 710127）

摘 要：关注生态系统服务价值（Ecosystem service value，ESV）与城市化耦合协调互动关系，对黄河流域高质量发展大有裨益。文章运用熵权法、耦合协调模型、空间自相关模型，障碍度模型分析了城市化与ESV的耦合协调关系及主导障碍因素。结果表明：（1）1995—2018年，黄河流域ESV发生了很大的改善，整体增加了33.05×10^9元，且以调节服务为主导，草地、林地、耕地服务价值对总ESV贡献率较高。单位面积生态系统服务价值（PE）呈现南高北低、中游高上下游低的空间格局。（2）PE与城市化耦合协调度（Coupling coordination degree，CCD）逐渐改善，轻度耦合协调增加了27.12%，严重失调类型减少了45.46%，耦合亚型从城市化滞后型转变为ESV滞后型；从空间上看，CCD呈现南高北低、中游优于上游和下游的空间格局，协调度具有显著的空间正相关性，存在明显的高-高和低-低集聚特征，高-高集聚区主要分布在ESV高且城市化水平相对较高的中游和下游地区，低-低集聚区主要分布在ESV较低的上游地区。（3）1995—2018年主导障碍因素未发生明显改变，ESV系统以调节服务为主，而城市化系统以经济子系统和社会子系统为主。基于此，应厘清ESV和城市化耦合协调关系，关注城市化进程对区域生态系统服务能力和生态安全格局的影响，实现流域整体优质协调发展。

关 键 词：生态系统服务价值；城市化；耦合协调；障碍度模型；黄河流域
文章编号：

生态系统服务功能是指人类直接或间接的从生态系统功能、结构和过程中获取的维持人类生存和发展所需的产品或惠益[1]。千年生态系统评估根据生态环境、社会与人类福祉之间的联系，将其分为供给、调节、支持和文化服务四大类[2-4]。作为连接自然与人类社会的“桥梁”，生态系统服务功能的量化和评估，对土地资源规划及区域可持续发展有重要意义[5]。然而，目前全球有60%的生态系统正在或者已经退化[3]，主要受人类活动的影响，而城市作为众多人类活动集中且频繁的场所，从多方面推动生态系统服务价值（Ecosystem service value，ESV）的变化[6-7]。目前，全球城市化率已经由1950年的24%提升至2018年的55%[8]，人类社会正经历着前所未有的城市化进程。快速发展的城市化不断带动城市空间格局及景观环境的改变，带动不同领域之间物质、能源和信息的流通与相互作用，改变ESV的范围及供需结构。从长远来看，探索城市化与ESV之间的耦合协调关系以平衡城市化进程与生态系统保护关系，提升区域可持续发展是一个普遍且富有挑战的问题[7,9-12]。

关于城市化发展与ESV的耦合互动关系方面，以往大部分研究评估了城市化对ESV的影响[7,13-15]。有学者应用数理统计模型、空间探索性分析等方法，探究了城市化发展与生态系统服务之间的关系，发现城镇化与各类生态系统服务之间存在负相关[16]、正相关[17]及“倒U型”等多种关系[7,10]。很少有

收稿日期：2021-09-27； **修订日期**：2021-12-13
基金项目：陕西秦岭生态环境保护总体规划课题研究（208011900044）资助
作者简介：张凯莉（1993-），女，博士，主要从事生态规划和生态系统评估等方面的研究. E-mail: 202010238@stumail.nwu.edu.cn
通讯作者：刘康（1963-），男，教授，博士，主要从事生态规划和生态系统评估等方面的研究. E-mail: 20132381@nwu.edu.cn

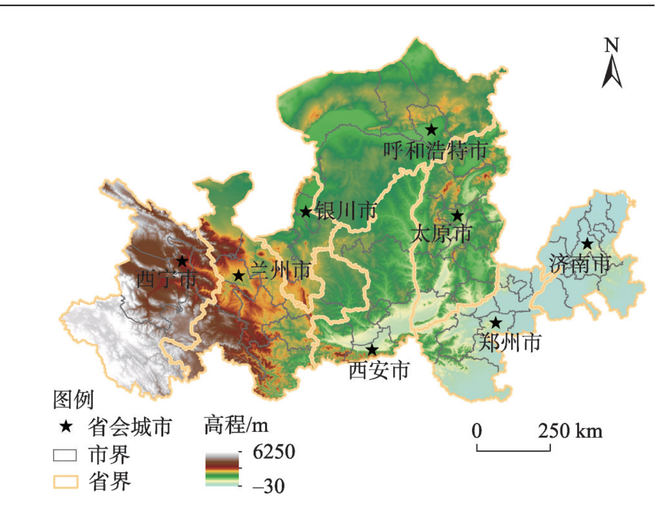
研究探索城市化与ESV之间的耦合协调互动关系，且少有的研究仅停留在耦合协调度的时空变化特征方面[7]；在驱动机制方面，并没有进一步深层次剖析影响二者耦合协调度的影响因素。大部分研究探究了引起生态系统服务变化的驱动因素，这些研究体现在对自然、经济社会等方面的因素，引起ESV的变化[18-19]。因此，建立一种有效的建模方法以明确量化综合城市化和多个ESV及其时空耦合关系具有重大意义[9]。

黄河流域横跨中国东、中、西部三大城市地区，是中国重要的生态安全保护屏障，同时，是国家战略层面生态保护和高质量发展的重点区域，对于该地区的研究有长远战略意义及区域代表性。由此，本文以中国黄河流域城市群为例，探索城市化与ESV之间的耦合互动关系及系统障碍因素，在科学评价黄河流域城市生态系统服务和城市化耦合协调度的基础上，对其时空分异特征和障碍因素进行考察，以期为黄河流域生态保护与高质量发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河发源于青藏高原，流域面积达752442 km^2，流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9省。地势东低西高，区域地形变化多端[20]。流域内气候类型多样，涉及干旱、半干旱、半湿润气候。以内蒙古自治区托克托县河口镇、河南省荥阳市桃花峪为界，分为上中下游。上游为河源区，冰川地貌发育，面临生态系统退化、水源涵养功能下降的问题；中游主要为黄土地貌，地形破碎水土流失严重[21]；下游主要为冲积平原，城市化水平较高，生态流量偏低，是中国重要的粮食供给区。近年来，随着城市化的快速发展，生态系统服务供需不匹配问题日益突出，流域内部存在资源分布不均衡和高质量发展不充分不平衡的问题。因此，将其作为解决环境退化和区域发展不平衡问题方法的示范，对探索生态系统和城市化优化协调发展新模式有重要意义。本文以黄委会提供的黄河流域范围为基础，通过黄河流域流经的城市为基本单元划分流域上中下游。其中，上游包含青海、宁夏、内蒙古、甘肃各省流经的城市共计16个，中游包含甘肃、陕西、山西省大部分城市，共计22个，下游包含



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 黄河流域地理区位图

Fig. 1 Geographical location of the Yellow River Basin

河南、山东省的21个城市（图1）。

1.2 数据来源

本章涉及数据包括以下几类，黄河流域地区的土地利用数据、数字高程数据（DEM）、净初级生产力（Net primary production，NPP）以及相关社会经济统计数据。其中，土地利用数据和DEM均来自中国科学院资源环境科学数据中心，分别为250 m×250 m的DEM栅格数据和30 m×30 m土地覆被栅格数据；NPP数据源于美国NASA EOS/MODIS的MOD17 A3H产品。社会经济数据来自1995—2018年《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》黄河流域各省（区）及相关地级市的统计年鉴。对于缺失的个别指标，使用均值法和插值法，根据相邻年份的数据补充完整。

1.3 评估方法

（1）生态系统服务评估

根据黄河流域城市群的土地资源特征和研究目标，将土地生态系统分为7类：耕地、草地、林地、水体、湿地、未利用地和建筑用地[7,10,22]。参考Costanza的ESV当量因子法，结合谢高地等的基于问卷的ESV当量因子表以及中国的区域校正系数[4,22-26]，本文从静态粮食价格和净初级生产量时空动态变化两方面进行黄河流域单位价值当量修正。

首先，我们通过粮食价格进行修正。许多学者认为天然粮食产量等于实际粮食产量的1/7[7,24-26]。本文采用3种主要粮食平均价格作为基础，将不包括人类投入成本的农田生态系统的平均净利润作为

标准等价因子，根据黄河流域城市单位粮食产量和同期全国单位面积粮食产量比值作为修正系数[27]，进一步考虑到通货膨胀，使用居民粮食消费价格指数对粮食价格进行修正。最终，确定了黄河流域一个静态当量因子的经济价值。

$$\delta = \frac{1}{7} \times \frac{R+M+N}{3} \times \frac{\alpha}{\beta} \times \lambda \tag{1}$$

式中：δ 为该区域一个标准单位的当量价值；R、M、N 分别为小麦、玉米、水稻3种主要粮食作物价格；α、β 分别为研究区域城市单位面积粮食产量和同期全国单位面积粮食产量；λ 为居民粮食消费价格指数。

其次，为反映不同区域不同景观类型生态系统服务能力的差异，采用NPP进一步修正其当量因子。确定了时空动态当量价值的修正系数，具体如下：

$$F_i = N_i / \overline{N_i} \tag{2}$$

式中：F_i 为NPP的时空动态调整因子。NPP是碳循环的主要组成部分之一，它代表了生态系统的碳储存能力，研究表明不同地理地貌和植被状况，NPP呈现不同的增长趋势，因此NPP可以在一定程度上反映生态系统服务能力的差异性[28-29]。N_i 为第 i 年不同区域的NPP($t \cdot hm^{-2}$)；$\overline{N_i}$ 为第 i 年区域平均NPP($t \cdot hm^{-2}$)。基于此，ESV的计算公式如下：

$$ESV = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k}^{n} A_{jk} \times VC_{jk} \tag{3}$$

式中：ESV为区域生态系统服务价值(元)；A_{jk} 为第 j 个生态系统 k 的面积(hm^2)；VC_{jk} 为第 j 个生态系统 k 的价值系数；j 为生态系统数量；k 为生态系统服务的类型。

(2) 城市化指标体系建立

本文从人口城市化、空间城市化、经济城市化和社会城市化，4个维度来反映黄河流域综合城市化发展水平。通过熵值法给各项指标赋权重，最终确定黄河流域城市城镇化综合评价指数(表1)。

1.4 研究模型

为科学测度与评价黄河流域城市化与ESV耦合协调关系，本研究涉及到的方法和模型，具体计算公式及指标解释见表2。

依据耦合协调度值 CCD_{it}，将两子系统的耦合协调水平分为5大类15亚类型基本形态，具体的分类与对应的数值大小如下(表3)。

2 结果与分析

2.1 黄河流域城市化进程

总体而言，黄河流域城市化综合水平从1995—2018年不断提升(图2)。经济城市化发展水平对综

表1 城市化综合评价指标体系

Tab. 1 Comprehensive evaluation index system for urbanization

准则层	指标层	单位	权重
人口城市化	人口密度	人·km^{-2}	0.041
	城镇人口密度	人·km^{-2}	0.054
	非农人口比重	%	0.022
空间城市化	建成区占土地总面积百分比	%	0.063
	每万人的市区面积	km^2	0.070
	人均铺装道路面积	m^2	0.039
	人均绿地面积	人·m^{-2}	0.051
	建成区绿化覆盖率	%	0.013
经济城市化	人均国内生产总值	元	0.063
	二、三产业占GDP比重	%	0.005
	限额以上工业总产值	10^{4}元	0.103
	固定资产投资总额	10^{4}元	0.088
	人均财政收入	元	0.080
	职工平均工资	元	0.059
社会城市化	人均消费品零售总额	元	0.075
	中小学生在校人数	10^{4}人	0.035
	人均公共图书馆藏书	册	0.045
	万人拥有医疗床位	张	0.016
	万人互联网用户	10^{4}人	0.076

表2 研究模型及指标

Tab. 2 Research models and indicators

研究模型	计算公式	模型释义	意义
极值标准化	$X_{mj}=[x_{mj}-\min(x_{mj})]/[\max(x_{mj})-\min(x_{mj})]$正指标 $X_{mj}=[\max(x_{mj})-x_{mj}]/[\max(x_{mj})-\min(x_{mj})]$负指标	X_{mj}为系统m，指标j归一化后的值；x_{mj}为各系统的原始取值；$\max(x_{mj})$与$\min(x_{mj})$分别为各系统j个指标的最大值和最小值	消除数据间屏蔽效应和量纲差异
熵权法	$\begin{cases} \mu_{pj}=\dfrac{1+X_{pj}}{\sum_{i=1}^{n}(1+X_{pj})} \\ e_j=-\dfrac{1}{\ln(n)}\sum_{i=1}^{n}\mu_{pj}\times\ln(\mu_{pj}) \\ g_j=1-e_j \\ W_j=\dfrac{g_j}{\sum_{j=1}^{m}g_j} \end{cases}$	X_{pj}为第p个城市j指标的归一化值；W_j为各指标权重；μ_{pj}为第p个城市j指标的比重；e_j为指标的信息熵；g_j为信息熵冗余度；n为城市样本数量；m为系统指标数量	客观确定指标权重
综合发展指数	$\varphi=\sum_{j=1}^{m}W_j\times X_{pj}$	当m取E时，φ为ESV系统；当m取U时，φ为城市化系统	获得子系统的综合效益
欧式距离耦合度	$C_{it}=\left[1-\sqrt{\dfrac{\sum_{1}^{2}(w_{it}-w'_{it})}{\sum_{1}^{2}Q_i^2}}\right]^k$	C_{it}为两系统耦合度，以w_{1t}、w'_{1t}和w_{2t}、w'_{2t}分别为城市化系统和ESV系统第t年水平的实际值和理想值，取$Q_1=Q_2=1$为调节系数，一般取$k=2$[30-31]	C_{it}取值在(0, 1)之间，C_{it}值越大，说明系统实际耦合协调状态与理想状态距离更贴合，耦合度越高
耦合协调度	$\begin{cases} \mathrm{CCD}_{it}=(C_{it}\times T_{it})^{1/2} \\ T_{it}=(\alpha\varphi_{\mathrm{E}}+\beta\varphi_{\mathrm{U}})^{1/2} \end{cases}$	CCD_{it}为协调度；T_{it}为耦合协调发展水平指数，取$\alpha=\beta=0.5$；φ_{E}为ESV系统；φ_{U}为城市化系统	具体分级见表3
Moran'I检验	$I=\dfrac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}w_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{S^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}w_{ij}}$	I为全局莫兰指数，取值在(-1, 1)之间，大于0代表正相关，即高值与高值临近，小于0代表负相关，即高值与低值临近；w_{ij}为空间权重矩阵；x_i、x_j分别为要素i、j的属性值；$\bar{x}$为要素属性值的平均值；S^2为样本方差；m、n分别为相邻指标空间要素数量	空间自相关检验
局部Geary指数	$\begin{cases} C=\dfrac{(n-1)\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i-x_j)^2}{2(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij})\left[\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})\right]^2} \\ C^*=\dfrac{C-1}{\sqrt{\mathrm{Var}(C)}} \end{cases}$	C为吉尔里指数(Geary)指数，取值在(0, 2)之间，大于1表示负相关，小于1表示正相关，一般认为其比莫兰指数对局部空间相关更为敏感；C^*为局部Geary指数；$\mathrm{Var}(C)$为Geary指数的方差	局部空间自相关检验，识别空间集聚模式
障碍度	$\begin{cases} Q_j=I_jW_j/\sum_{j=1}^{n}I_jW_j\times100\% \\ I_j=1-X_{ij} \end{cases}$	Q_j为障碍度；W_j为因子贡献度，一般用指标权重表示；I_j为指标偏离度，指标实际值与最优值之间差距，用1与标准化值X_{ij}之差表示[32]	识别影响两系统耦合协调关系的主导障碍因素

合城市化发展水平的影响最大。经济城市化代表着城市化比例的上升，并在促进城市化进程中发挥着越来越重要的作用，1995—2018年经济城市化的占比从0.86跃升至0.44。此外，社会城市化也在综合城市化发展中的作用持续增强，2018年社会城市化的占比增长至0.28。人口和空间城市化对综合城市化的贡献逐渐减弱，分别减少了0.18和0.20。结果表明，黄河流域城市群的城市化进程已从最初的人口城市化为主导的阶段转变为以社会城市化和经济发展为特征的中间阶段，该阶段取决于经济的快速发展和人们日益增加的物质基础和生活水平的提高。

2.2 黄河流域土地利用和生态系统服务变化特征

2.2.1 土地利用变化 从时间上来看，1995—2018年黄河流域不同土地类型有明显改变，但各类型土地贡献较为稳定，各土地类型面积贡献从高到低依次为：草地>耕地>林地>未利用地>建筑用地>湿地>水体（表4）。1995—2018年，黄河流域城市不同土地利用类型面积发生了显著变化：耕地、草地、未利用地面积均显著下降，分别下降了3.26%（11.36×10^5 hm²），5.74%（21.22×10^5 hm²），1.14%（0.88×10^5 hm²），而其他4类用地类型的面积均不同程度的增加。林地增加了6.23%（7.59×10^5 hm²），水体增加了33.07%（1.24×10^5 hm²），湿地增加了21.14%（2.45×

表3 耦合关系的判断标准

Tab. 3 Judgment criteria for coupling relationship

协调大类	耦合协调度	对比关系	亚类型
严重失调型	0.0≤CCD≤0.2	$U-E>0.1$	严重失调ESV滞后型
		$\lvert E-U\rvert\le0.1$	严重失调同步型
		$E-U>0.1$	严重失调城市化滞后型
轻度失调型	0.2<CCD≤0.4	$U-E>0.1$	轻度失调ESV滞后型
		$\lvert E-U\rvert\le0.1$	轻度失调同步型
		$E-U>0.1$	轻度失调城市化滞后型
轻度耦合协调	0.4<CCD≤0.6	$U-E>0.1$	轻度耦合协调ESV滞后型
		$\lvert E-U\rvert\le0.1$	轻度耦合协调同步型
		$E-U>0.1$	轻度耦合协调城市化滞后型
良好耦合协调	0.6<CCD≤0.8	$U-E>0.1$	良好耦合协调ESV滞后型
		$\lvert E-U\rvert\le0.1$	良好耦合协调同步型
		$E-U>0.1$	良好耦合协调城市化滞后型
优质耦合协调	CCD>0.8	$U-E>0.1$	优质耦合协调ESV滞后型
		$\lvert E-U\rvert\le0.1$	优质耦合协调同步型
		$E-U>0.1$	优质耦合协调城市化滞后型

注：CCD为耦合协调度；E为生态系统服务价值综合指数；U为城市化发展综合指数。

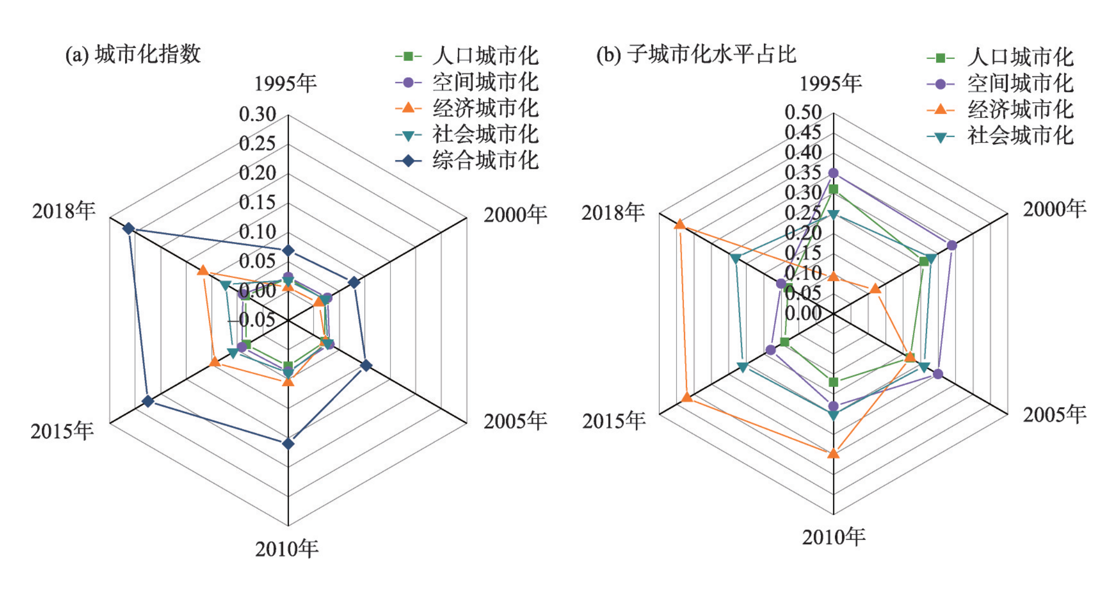


图2 1995—2018年城市化水平变化趋势

Fig. 2 Change trends of urbanization level from 1995 to 2018

10^5 hm²)，在此期间，建筑用地增加比例最大，为60.68%(22.08×10^5 hm²)。

从空间分布上来看，图3和图4展示了1995年和2018年黄河流域城市土地景观类型空间分布及分流域土地景观类型面积变化情况。黄河流域土地景观类型以草地、耕地和林地为主，其中草地在中上游地区广泛分布，面积占比约为40%以上；中游地区以耕地、草地和林地为主，建筑用地持续增加，其他类型面积较为稳定；下游地区以耕地为主，面积占比超过60%，耕地、草地面积持续下降，水体、湿地、建筑用地稳定增加。

2.2.2 黄河流域生态系统服务价值变化 表5为1995—2018年黄河流域不同景观类型生态系统服务价值。结果发现，黄河流域城市生态系统服务总价值由728.15×10^9元增长为761.20×10^9元，变化量为33.05×10^9元，表明在此期间生态系统服务功能发生了很大的改善。各土地类型价值贡献率从高到低依次为：草地>林地>耕地>湿地>水体>未利用地；其中，耕地价值下降了4.44×10^9元(变化率为−2.83%)；然而，其他用地的ESV不同程度的增加，

表4 1995—2018年土地利用面积变化

Tab. 4 Change of land use area from 1995 to 2018

土地利用面积变化	年份	耕地	林地	草地	水体	湿地	建筑用地	未利用地
土地利用面积/10^5 hm^2	1995	348.65	121.75	369.54	3.75	11.59	36.39	77.50
	2005	348.25	129.00	353.46	4.00	13.00	41.31	80.16
	2015	341.95	129.15	348.40	4.65	12.35	54.34	78.31
	2018	337.29	129.34	348.32	4.99	14.04	58.47	76.62
变化量/10^5 hm^2	1995—2005	−0.40	7.25	−16.08	0.25	1.41	4.92	2.66
	2005—2015	−6.30	0.15	−5.06	0.65	−0.65	13.03	−1.85
	2015—2018	−4.66	0.19	−0.08	0.34	1.69	4.13	−1.69
	1995—2018	−11.36	7.59	−21.22	1.24	2.45	22.08	−0.88
变化率/%	1995—2005	−0.11	5.95	−4.35	6.67	12.17	13.52	3.43
	2005—2015	−1.81	0.12	−1.43	16.25	−5.00	31.54	−2.31
	2015—2018	−1.36	0.15	−0.02	7.31	13.68	7.60	−2.16
	1995—2018	−3.26	6.23	−5.74	33.07	21.14	60.68	−1.14

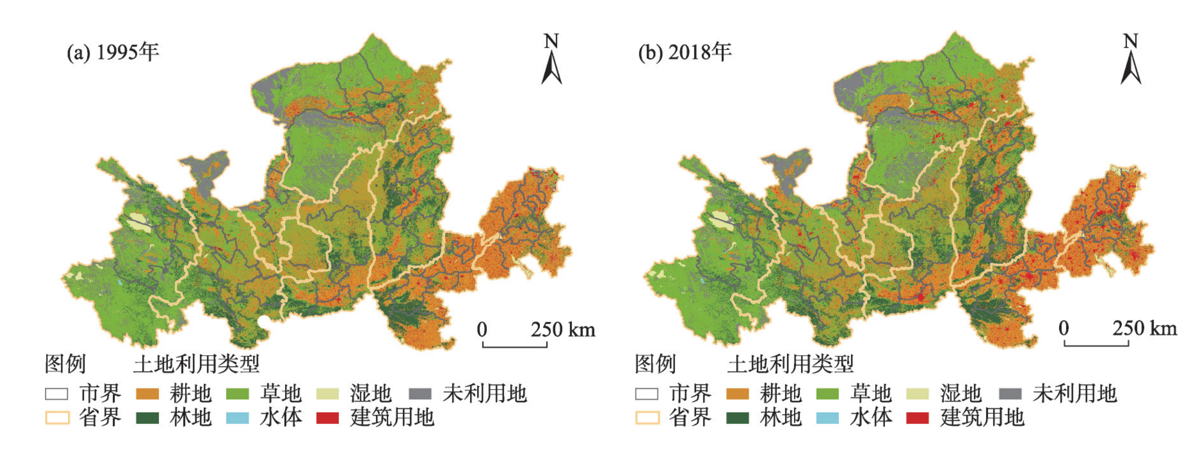


图3 1995—2018年黄河流域土地利用空间格局分布

Fig. 3 Distributions of spatial pattern of land use in the Yellow River Basin from 1995 to 2018

其中林地的增加量最高，为15.20×10^9元（变化率8.27%）；其次，草地和湿地分别增加了11.31×10^9元和7.66×10^9元（变化率3.85%和9.24%），此外，虽然水体的服务价值增加量相比于其他景观类型较小，但整体增长率最高（为33.50%）。湿地和水体的面积较小，但是由于其较高生态系统调节能力也引起了ESV总量和结构的剧烈波动变化，抵消了由于草地和耕地面积减少引起ESV的整体下降。

图5为1995—2018年黄河流域不同亚类型生态系统服务价值。黄河流域各亚类型生态系统服务价值从高到低依次表现为：调节服务>供给服务>文化服务，调节服务贡献了ESV价值的一半以上（85.99%~86.14%），其次是供给服务（9.14%~8.91%）和文化服务（4.84%~4.95%）；1995—2018年各项服务类型价值不同程度的发生变化，到2018年均呈现增加趋势，其中文化服务变化率最高为6.02%，调节服务、供给服务的变化率分别为4.84%、0.98%。总体而言，尽管各ESV亚型的值都发生了波动，但是这些波动并没有从根本上改变ESV的结构。

图6为1995—2018年黄河流域单位面积生态系统服务价值（PE）时空分布和局部Geary指数（C^*）聚类模式图。尽管在研究期间黄河流域地区PE值的空间分布没有显著变化，但由于土地利用结构和地理区域的差异，空间分布格局明显。对PE进行全局莫兰检验（表6），结果显示，Moran'*I*指数估计值随时间呈现增加趋势，表明黄河流域城市PE具有显著的空间自相关，且空间相关性不断增强。根据C^*指数聚类模式图，我们可以看出黄河流域PE呈现南高北低，上下游低，中游高的分布模式。高-高集聚模式位于黄河流域中游的陇南市和宝鸡市周边以

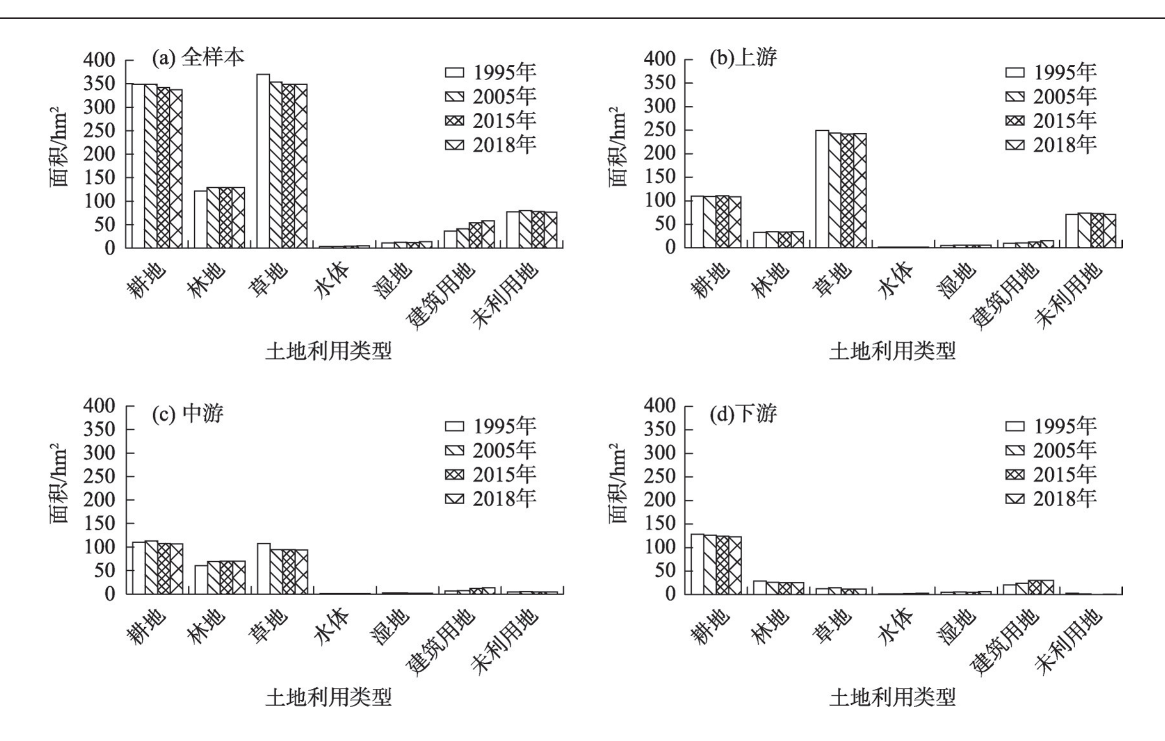


图4 1995—2018年黄河流域土地利用面积变化

Fig. 4 Change of land use area in the Yellow River Basin from 1995 to 2018

表5 1995—2018年不同景观类型生态系统服务价值

Tab. 5 Ecosystem service value of different landscape types from 1995 to 2018

ESV	年份	耕地	林地	草地	水体	湿地	未利用地	汇总
ESV/10^9元	1995	156.76	183.79	293.68	9.91	82.92	1.09	728.15
	2000	158.98	195.16	283.86	9.56	84.40	1.08	733.04
	2005	157.27	193.59	282.20	10.04	88.34	1.08	732.52
	2010	156.33	201.44	293.60	12.90	78.60	1.04	743.91
	2015	154.76	198.64	288.63	12.67	80.46	0.99	736.15
	2018	152.32	198.99	304.99	13.23	90.58	1.09	761.20
变化量/10^9元	1995—2000	2.22	11.37	−9.82	−0.35	1.48	−0.01	4.89
	2000—2005	−1.71	−1.57	−1.66	0.48	3.94	0.00	−0.52
	2005—2010	−0.94	7.85	11.40	2.86	−9.74	−0.04	11.39
	2010—2015	−1.57	−2.80	−4.97	−0.23	1.86	−0.05	−7.76
	2015—2018	−2.44	0.35	16.36	0.56	10.12	0.10	25.05
	1995—2018	−4.44	15.20	11.31	3.32	7.66	0.00	33.05
变化率/%	1995—2000	1.42	6.19	−3.34	−3.53	1.78	−0.92	0.67
	2000—2005	−1.08	−0.80	−0.58	5.02	4.67	0.00	−0.07
	2005—2010	−0.60	4.05	4.04	28.49	−11.03	−3.70	1.55
	2010—2015	−1.00	−1.39	−1.69	−1.78	2.37	−4.81	−1.04
	2015—2018	−1.58	0.18	5.67	4.42	12.58	10.10	3.40
	1995—2018	−2.83	8.27	3.85	33.50	9.24	0.00	4.54

注:ESV为生态系统服务价值。下同。

及山西省各城市。同样明显的是,在黄河流域的上游北部地区呈现低-低集聚,由于该地区主要以草地和未利用地为主,生态环境本底脆弱,导致其生态系服务能力较低。

2.3 黄河流域城市化与ESV耦合协调关系

2.3.1 黄河流域城市耦合协调度的时空异质性 本文选择1995、2005、2015年和2018年作为横断年,以分析黄河流域地级市的耦合协调关系在ESV和

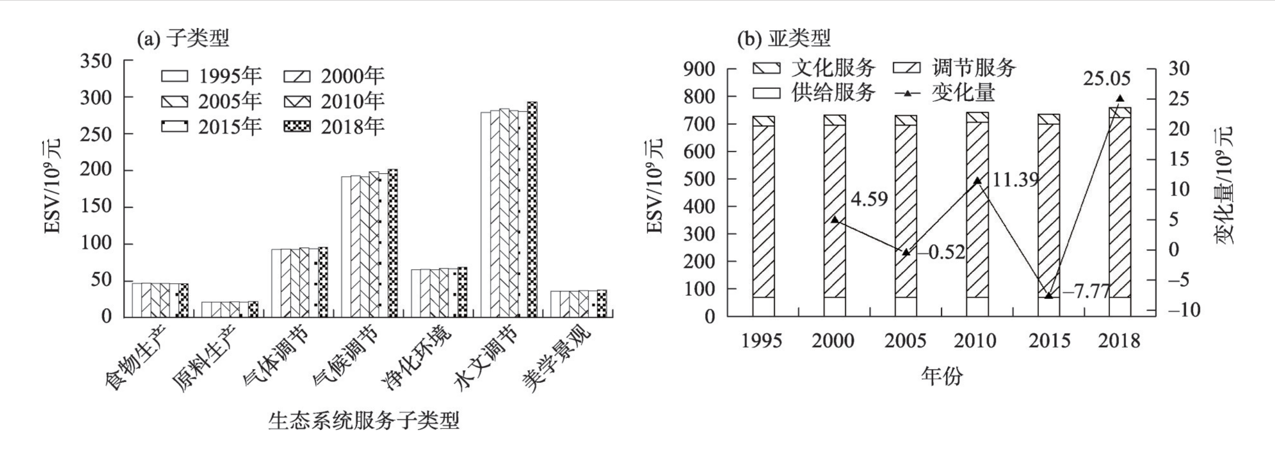


图5 1995—2018年黄河流域不同生态系统服务类型价值变化

Fig. 5 Changes in the value of different ecosystem service types in the Yellow River Basin from 1995 to 2018

表6 1995—2018年黄河流域单位面积ESV空间莫兰检验(Moran' *I*指数)

Tab. 6 Spatial Moran test (Moran' *I* index) of ESV per unit area in the Yellow River Basin from 1995 to 2018

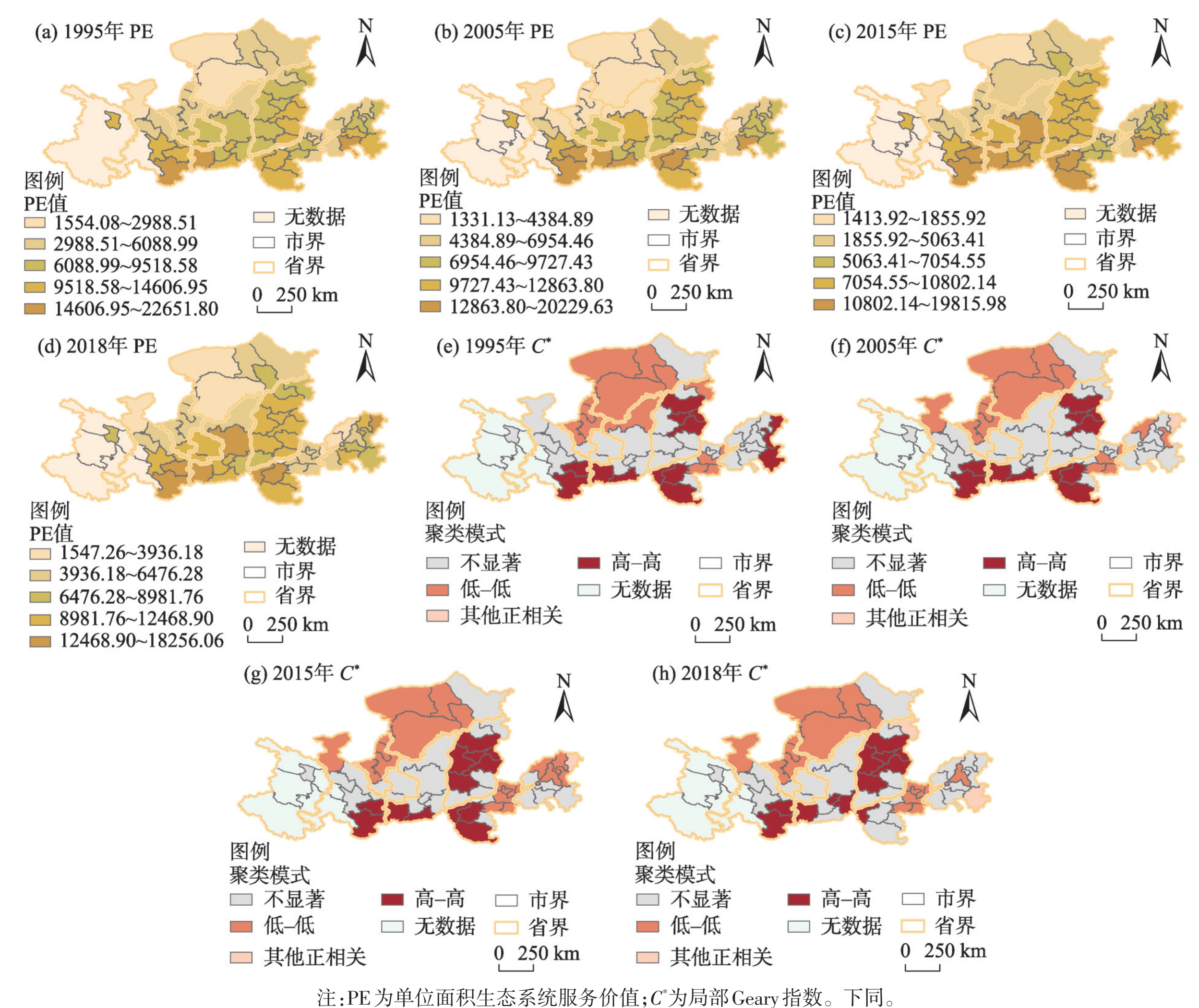
全局莫兰检验	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2018年
Moran' *I*	0.562	0.570	0.621	0.636	0.651	0.638
Z	5.893	6.086	6.824	7.001	7.267	7.042
P	0.001	0.001	0.001	0.001	0..001	0.001

注:*Z*为标准差的倍数;*P*为显著性水平。下同。

城市化之间的不同空间分布和变动情况(图7)。结果显示,1995年黄河流域耦合协调度表现为3种类型:60.80%(40个)的城市发展严重失调,25.42%(15个)的城市发展处于轻度失调,轻度耦合协调仅占6.78%(4个)。主要亚型表现为城市化滞后(占62.71%)和同步型(37.29%),这主要由该时期黄河流域落后的经济发展所导致的。2005—2015年,轻度耦合协调类型明显增加,严重失衡的城市数量急剧减少。耦合亚型以轻度失调同步型(32.20%)和城市化滞后型(44.07%)为主导。2018年黄河流域城市ESV和城市化协耦合协调度明显提升,轻度耦合协调城市达到33.90%(20个)。并且整体耦合协调亚型有向生态系统服务滞后(37.29%)发展的趋势。

利用Geoda软件对CCD进行空间莫兰检验,1995—2018年黄河流域CCD莫兰指数均在1%水平显著(表7),进一步得到耦合协调度的局部Geary(C^{*})指数聚类分布图(图7)。整体来看,低-低模式主要分布在黄河流域上游,该地区生态环境本底脆弱,生态系统服务能力较弱,单位面积ESV极低,加之其经济发展落后,整体处于低耦合协调发展水平,并且随着城市化的扩张和蔓延,生态资源难免遭到破坏,不利于生态系统与城市化的协调发展。高-高模式主要分布在中下游地区,尤其中游地区作为黄河流域生态脆弱区和重要生态功能区,退耕还林还草等一系列生态恢复工程的实施,使得生态环境整体改善,提升了区域ESV,也为经济社会发展创造了良好条件,提升了区域间的正向空间溢出效应。

2.3.2 生态系统服务和城市化耦合协调度的主导障碍因素探究 本文利用障碍度模型评估准则层和指标层的主导障碍因素,进而诊断制约两者耦合协调发展的主要影响因素。从准则层来看(表8),城市化系统中,主导障碍因素为经济城市化,ESV系统中以调节服务为主,占整个系统的一半以上。1995—2018年两系统各准则层障碍度结构相对稳定。障碍度平均值大小排序为:调节服务>经济城市化>空间城市化>社会城市化>供给服务>文化服务>人口城市化。另外,1995—2018年ESV系统中供给服务障碍度呈上升趋势,说明在快速城市化进程和生态环境协调发展过程中,人类社会与生态环境的竞争日益加剧,这对生态系统供给服务能力产生了极大制约作用。城市化系统中空间城市化和人口城市化的障碍度也不断增加,对耦合协调度的制约作用逐渐突出。



注:PE为单位面积生态系统服务价值;C^*为局部Geary指数。下同。

图6　1995—2018单位面积生态系统服务价值(PE)空间分布和聚类模式

Fig. 6　Spatial distribution patterns and spatial correlation cluster maps of the PE from 1995 to 2018

表7　1995—2018年黄河流域耦合协调度空间莫兰检验(Moran' *I*指数)

Tab. 7　Space Moran test (Moran' *I* index) of coupling coordination degree in the Yellow River Basin from 1995 to 2018

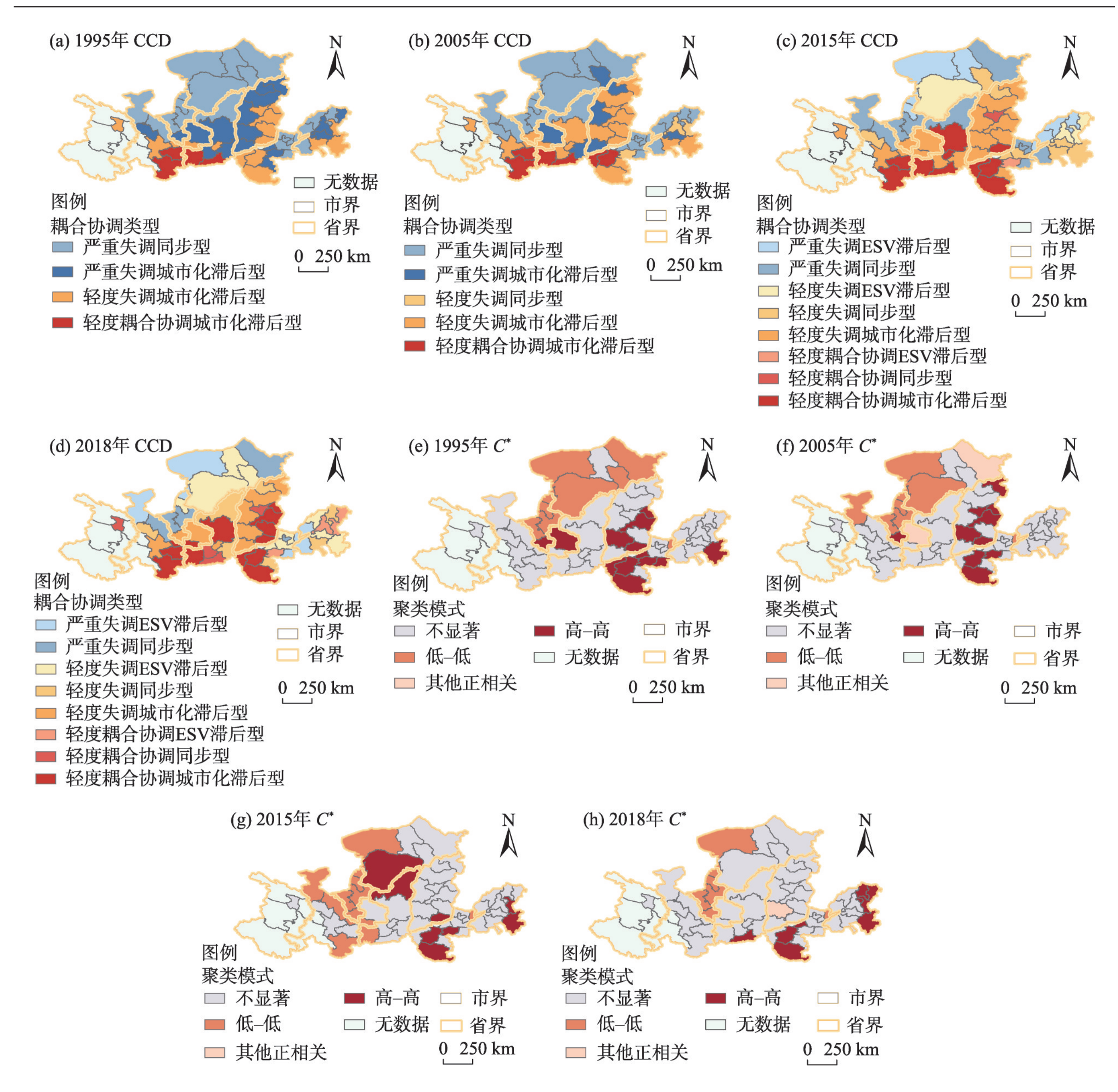
全局莫兰检验	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2018年
Moran' *I*	0.418	0.425	0.386	0.281	0.355	0.324
Z	5.034	5.171	4.644	3.503	4.338	3.945
P	0.001	0.001	0.001	0.001	0..001	0.001

为确定具体的障碍指标,对1995—2018年26个指标中,排列前5的障碍因子进行提取,如表9所示,各主导障碍因素体现在系统内部要素的不同方面。随着城市化的发展和蔓延,人类活动对区域生态环境的干扰,导致区域资源差异显著。从而造成黄河流域ESV和城市化耦合协调关系较为复杂。一方面,ESV系统调节服务,包括水文调节、气候调节、净化环境成为二者耦合度的主要制约因素。应当加强森林、水体、湿地价值系数较高的土地生态系统的保护和发展,发挥其优质的调节服务功能。另一方面,在城市化系统制约因素中,互联网用户数在社会城市化系统中障碍度较高,作为一种信息技术指标,互联网发展水平的高低,也是促进城市发展的重要因素之一。

3　讨 论

3.1　黄河流域ESV与城市化耦合协调关系的探讨

作为耦合自然和社会过程的桥梁和联系,生态



注:CCD为生态系统服务价值与城市化发展耦合协调度。

图7 1995—2018年黄河流域CCD的时空分异特征及聚类模式

Fig. 7 Spatial-temporal differentiation characteristics and clustering patterns of CCD in the Yellow River Basin from 1995 to 2018

表8 城市化与ESV系统准则层障碍度

Tab. 8 Urbanization and ESV system criterion-level obstacles

年份	城市化系统/%				ESV系统/%		
	人口城市化	空间城市化	经济城市化	社会城市化	供给服务	调节服务	文化服务
1995	10.25	22.82	42.23	24.70	23.82	59.75	16.43
2000	10.47	22.76	42.30	24.47	24.00	59.42	16.58
2005	10.53	22.95	41.93	24.58	24.10	59.29	16.61
2010	10.59	23.83	40.78	24.80	24.20	59.29	16.50
2015	10.93	25.44	39.17	24.47	24.21	59.28	16.51
2018	11.13	27.24	38.04	23.59	24.49	59.03	16.49

表9　主要障碍因子及其障碍度

Tab. 9　Main obstacle factors and their degree of obstacle

年份	ESV系统/%				
	原料生产	气候调节	净化环境	水文调节	美学景观
1995	18.46	19.89	15.87	13.89	16.43
2000	18.60	20.02	16.03	13.19	16.58
2005	18.68	20.12	16.05	12.89	16.61
2010	18.60	20.01	16.01	13.03	16.50
2015	18.62	20.04	16.02	12.98	16.51
2018	18.64	20.05	15.97	12.68	16.49
年份	城市化系统/%				
	限额以上工业总产值	固定资产投资总额	人均财政收入	人均消费品零售总额	万人互联网用户
1995	11.06	9.44	8.59	7.97	8.17
2000	11.11	9.52	8.67	7.98	8.07
2005	11.11	9.55	8.77	7.88	8.15
2010	10.90	9.59	9.02	7.64	8.27
2015	10.59	9.36	9.34	6.88	8.19
2018	10.58	9.03	9.90	6.70	7.24

系统服务的实践性，通过区域城市化发展与ESV耦合协调关系的评估，可以为城市规划与土地资源管理提供相关政策的定量信息，帮助确定优先管理事项[33]。研究期间，黄河流域城市化与ESV之间的耦合协调度从严重失调过渡到轻度耦合协调和轻度失调，证明黄河流域城市ESV与城市化互动耦合十分紧密，二者形成了密切的依托关系。黄河流域转变经济增长方式，通过人们生活方式转变、资源利用效率的提升保持经济持续上升，取代了之前的粗放型经济增长模式，生态环境得到保护。耦合亚型由城市化滞后型，转化为同步发展与ESV滞后，这证明低冲突和潜在危机是它们之间的主要关系，伴随城市化发展，ESV的增长落后于城市化发展。为了缓解经济快速发展带来的生态问题，中国政府采取了一系列措施[34-35]。生态系统服务，包括土壤保持、生物多样性、防风固沙等功能被纳入中国当前的土地规划政策中[36]。然而，进一步将耦合协调发展类型与国家生态功能区划及资源承载力等共同纳入国家土地规划中，是未来值得考虑的方向。

3.2　依托城市群廊道，差异施策，助力高质量发展

黄河流域生态本底脆弱，经济发展相对落后，区域差异明显，内部关系复杂，为避免某一系统形成对二者耦合协调关系的胁迫作用[37]，应充分利用区域间的正向溢出效应，立足各城市群已经形成的连通廊道，跨行政区进行生态规划与治理，建立可持续生态网络管理，结合耦合协调发展模式差异施策，推进ESV与城市化优质协同发展[38]。

对ESV滞后型地区，除了考虑要素禀赋因素外，也要考虑建立并完善适应区域耦合协调发展的补偿机制，避免进一步的经济空间分异。环境改善后，下游居民作为受益者，应适当承担上游为保护生态环境而承受的损失[39]；在黄河流域的生态工程中，建议加强保护并恢复生物多样性，使保护优先、自然恢复逐渐取代工程性修复[40]。

针对城市化滞后型地区，以黄河流域高质量发展为契机，发挥以信息和技术为主导的智慧城市和城市森林景观格局对于两系统优质协调作用[41]。通过涵盖生物多样性的环境评估和大规模区划等过程，在基础设施投资规划和开发中，例如在运输系统设计和管理中，体现生物多样性的考虑因素，采取措施保护生态连通性。

针对ESV与城市化同步滞后地区，协调经济与生态系统的关系，加强环境调控，从全球视角推进城市化建设，科学划定城市开发边界、生态保护红线及永久基本农田三条引导线[42]，加强不同城市城市化的分类指导，打造多样多维城市化。

4　结　论

（1）研究期间，黄河流域ESV发生了很大的改善，单位面积ESV呈现南高北低、中游高、上下游低

的空间格局；各土地类型价值贡献率从高到低依次为：草地>林地>耕地>湿地>水体>未利用地；各亚型服务价值表现为：调节服务>供给服务>文化服务。

（2）从时间上来看，1995—2018年耦合协调度有明显改善，轻度耦合协调逐渐增多，严重失调类型显著减少，耦合亚型从城市化滞后发展为ESV落后和同步型。从空间上看，呈现南高北低，中游优于上游和下游的空间格局。

（3）经济城市化、社会城市化以及调节服务是制约ESV与城市化耦合协调发展的主要因素。为避免城市化快速发展，对生态系统服务功能产生胁迫作用，未来推进城市化高级阶段发展，势在必行；"因城定位"合理规划土地资源，"因地施策"加强高价值系数的生态系统维护，通过潜能释放推动耦合协调关系高级跃升。

参考文献（References）

[1] Daily G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington DC: Island Press, 1997: 49–68.

[2] Millennium Ecosystem Assessment. People and ecosystems: A framework for assessment[M]. Washington DC: Island Press, 2003: 26–48.

[3] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: Synthesis[M]. Washington DC: Island Press, 2005: 1–9.

[4] Costanza R, D'arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 25(1): 3–15.

[5] 蒋明卓, 李殿生, 苏欢. 快速城市化地区生态系统服务价值演化及空间自相关特征分析——以河南省洛阳市为例[J]. 林业经济, 2020, 42(7): 51–61. [Jiang Mingzhuo, Li Diansheng, Su Huan. Analysis on the evolution of ecosystem service value and its spatial autocorrelation pattern in rapid urbanization area: Taking Luoyang City in Henan Province as an example[J]. Forestry Economics, 2020, 42(7): 51–61.]

[6] Zhou D Y, Tian Y Y, Jiang G H. Spatio-temporal investigation of the interactive relationship between urbanization and ecosystem services: Case study of the Jingjinji urban agglomeration, China[J]. Ecological Indicators, 2018, 95: 152–164.

[7] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities[J]. Science, 2008, 319(5864): 756–760.

[8] 赵建吉, 刘岩, 朱亚坤, 等. 黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 159–171. [Zhao Jianji, Liu Yan, Zhu Yakun, et al. Spatiotemporal differentiation and influencing factors of the coupling and coordinated development of new urbanization and ecological environment in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 159–171.]

[9] Tian Y Y, Zhou D Y, Jiang G U. Conflict or coordination? Multiscale assessment of the spatio-temporal coupling relationship between urbanization and ecosystem services: The case of the Jingjinji Region, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106543, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106543.

[10] Zhang Y S, Lu X, Liu B Y, et al. Spatial relationships between ecosystem services and socioecological drivers across a large-scale region: A case study in the Yellow River Basin[J]. Science of the Total Environment, 2021, 766: 142480, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142480.

[11] Breuste J, Qureshi S, Li J X. Applied urban ecology for sustainable urban environment[J]. Urban Ecosystems, 2013, 16(4): 675–680.

[12] Li B, Chen D, Wu S, et al. Spatio-temporal assessment of urbanization impacts on ecosystem services: Case study of Nanjing City, China[J]. Ecological Indicators, 2016, 71: 416–427.

[13] Alam M, Dupras J, Messier C. A framework towards a composite indicator for urban ecosystem services[J]. Ecological Indicators, 2016, 60: 38–44.

[14] Peng J, Liu Y, Wu J, et al. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: A case study in Shenzhen City, China[J]. Landscape Urban Plan, 2015, 143: 56–68.

[15] Yuan Y J, Chen D X, Wu S H, et al. Urban sprawl decreases the value of ecosystem services and intensifies the supply scarcity of ecosystem services in China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 697: 134170, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134170.

[16] Liu W, Zhan J Y, Zhao F. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: A case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China[J]. Ecological Indicators, 2019, 98: 228–238.

[17] 赵育恒, 曾晨. 武汉城市圈生态服务价值时空演变分析及影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1426–1440. [Zhao Yuheng, Zeng Chen. Analysis of spatial-temporal evolution and factors that influences ecological service values in Wuhan urban agglomeration, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): 1426–1440.]

[18] 徐煖银, 郭泺, 薛达元, 等. 赣南地区土地利用格局及生态系统服务价值的时空演变[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 1969–1978. [Xu Xuanyin, Guo Luo, Xue Dayuan, et al. Land use structure and the dynamic evolution of ecosystem service value in Gannan Region, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): 1969–1978.]

[19] Peng J, Tian L, Liu Y, et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification[J]. Science of the Total Environment. 2017, 607: 706–714.

[20] 刘耕源, 杨青, 黄俊勇. 黄河流域近十五年生态系统服务价值变化特征及影响因素研究[J]. 中国环境管理, 2020, 12(3): 90–97. [Liu Gengyuan, Yang Qing, Huang Junyong. The change characteristics and influence factors of ecosystem services valuation of the Yellow River Basin from 2000 to 2015[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(3): 90–97.]

[21] 谷佳贺, 薛华柱, 董国涛, 等. 黄河流域NDVI/土地利用对蒸散

发时空变化的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 158-167. [Gu Jiahe, Xue Huazhu, Dong Guotao, et al. Effects of NDVI/land-use on spatiotemporal changes of evapotranspiration in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 158-167.]

[22] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 10-13. [Xie Gaodi, Xiao Yu, Zhen Lin, et al. Study on ecosystem services value of food production in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(3): 10-13.]

[23] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919. [Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911-919.]

[24] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.]

[25] Sun Y X, Liu S L, Dong Y H, et al. Spatio-temporal evolution scenarios and the coupling analysis of ecosystem services with land use change in China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 681: 211-225.

[26] Xu Z H, Wei H J, Fan W G, et al. Energy modeling simulation of changes in ecosystem services before and after the implementation of a Grain-for-Green Program on the Loess Plateau: A case study of the Zhifanggou Valley in Ansai County, Shaanxi Province, China[J]. Ecosystem Services, 2018, 31: 32-43.

[27] 南箔, 杨子寒, 毕旭, 等. 生态系统服务价值与人类活动的时空关联分析——以长江中游华阳河湖群地区为例[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3531-3541. [Nan Bo, Yang Zihan, Bi Xu, et al. Spatial-temporal correlation analysis of ecosystem services value and human activities: A case study of Huayang Lakes area in the middle reaches of Yangtze River[J]. China Environmental Science, 2018, 38(9): 3531-3541.]

[28] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Changshun, et al. The value of ecosystem services in China[J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740-1746.]

[29] 周雷雷, 郑诗军, 尹捷, 等. 以"胡焕庸线"为界的中国东西部净初级生产力变化分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4): 916-925. [Zhou Leilei, Zheng Shijun, Yin Jie, et al. Analysis on the change of net primary productivity in the east and west of China bounded by "The Hu Huanyong Line"[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(4): 916-925.]

[30] 汤铃, 李建平, 余乐安, 等. 基于距离协调度模型的系统协调发展定量评价方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(4): 594-602. [Tang Ling, Li Jianping, Yu Le'an, et al. Quantitative evaluation methodology for system coordination development based on distance coordnation degree model[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(4): 594-602.]

[31] 方创琳, 崔学刚, 梁龙武. 城镇化与生态环境耦合圈理论及耦合器调控[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2529-2546. [Fang Chuanglin, Cui Xuegang, Liang Longwu. Theoretical analysis of urbanization and eco-environment coupling coil and coupler control[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2529-2546.]

[32] 赵书虹, 白梦, 阮梦枝, 等. 云南省旅游资源与生态安全协调发展的时空演化特征及障碍因子分析[J]. 地理科学, 2021, 41(3): 493-503. [Zhao Shuhong, Bai Meng, Ruan Mengzhi, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and obstacle factors of coordinated development of tourism resources and ecological security in Yunnan Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(3): 493-503.]

[33] Tammi I, Mustajärvi K, Rasinmäki J. Integrating spatial valuation of ecosystem services into regional planning and development[J]. Ecosystem Services, 2016, 26: 329-344.

[34] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital[J]. Science, 2016, 352(6292): 1455-1459.

[35] Zhou D, Xu J C, Lin Z L. Conflict or coordination? Assessing land use multi-functionalization using production-living-ecology analysis[J]. Science of the Total Environment, 2017, 577: 136-147.

[36] Chen W X, Zeng J, Zhong M X, et al. Coupling analysis of ecosystem services value and economic development in the Yangtze River Economic Belt: A case study in Hunan Province, China[J]. Remote Sensing, 2021, 13: 1552, doi: 10.3390/rs13081552.

[37] Xing L, Zhu Y M, Wang J P. Spatial spillover effects of urbanization on ecosystem services value in Chinese cities[J]. Ecological Indicators, 2021, 121: 107028, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107028.

[38] 谷昊鑫, 秦伟山, 赵明明, 等. 黄河流域旅游经济与生态环境协调发展时空演变及影响因素探究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 628-638. [Gu Haoxin, Qin Weishan, Zhao Mingming, et al. Spatial and temporal evolution and influencing factors of coordinated development of tourism economy and ecological environment in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(2): 628-638.]

[39] 宋永永, 薛东前, 夏四友, 等. 近40 a黄河流域国土空间格局变化特征与形成机理[J]. 地理研究, 2021, 40(5): 1445-1463. [Song Yongyong, Xue Dongqian, Xia Siyou, et al. Change characteristics and formation mechanism of the territorial spatial pattern in the Yellow River Basin from 1980 to 2018, China[J]. Geographical Research, 2021, 40(5): 1445-1463.]

[40] 杨锐, 曹越. "再野化": 山水林田湖草生态保护修复的新思路[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8763-8770. [Yang Rui, Cao Yue. Rewilding: New ideas for ecological protection and restoration projects of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8763-8770.]

[41] Grossi G, Trunova O. Are UN SDGs useful for capturing multiple

values of smart city?[J]. Cities, 2021, 114: 103193, doi: 10.1016/J. CITIES.2021.103193.

[42] 李龙, 吴大放, 王芳, 等. 中国快速城市化区域生态系统服务价值预测及权衡研究——以佛山市为例[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9023–9036. [Li Long, Wu Dafang, Wang Fang, et al. Prediction and trade off analysis of ecosystem service value in the rapidly urbanizing Foshan City of China: A case study[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 9023–9036.]

Coordination and obstacle factors of urbanization and ecosystem service value in the Yellow River Basin

ZHANG Kaili[1], FENG Rongrong[1], LIU Tan[2], ZHANG Zhicheng[1], HAN Jianing[1], LIU Kang[1,3]

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 2. School of Economics & Management Northwest, University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 3. Xi'an Urban Forest Ecosystem Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710127, Shaanxi, China)

Abstract: Investigating the coordinated and interactive relationship between ecosystem service value (ESV) and urbanization is beneficial for the high-quality development of the Yellow River Basin, China. This study uses entropy method, coupling coordination model, spatial autocorrelation model, and obstacle degree model to analyze the coupling coordination relationship between urbanization and ESV and identify dominant obstacle factors. Results show the following: (1) From 1995 to 2018, the ESV of the Yellow River Basin greatly improved, with an overall increase of 33.05×10^9 yuan RMB, and is dominated by regulating services. The service value of grassland, woodland, and cultivated land has a higher contribution rate to the total ESV. The ESV per unit area (PE) presents a high and low spatial pattern in the south and north, respectively; further, the spatial pattern in the midstream is high and that in the upstream and downstream is low. (2) The coupling coordination degree (CCD) of PE and urbanization gradually improves, but it still exhibits an overall low level of coupling coordination. Light coupling coordination increases by 27.12%, serious disorder significantly decreases by 45.46%, and the coupling subtype develops from urbanization lagging to ESV lagging. Furthermore, the CCD shows a spatial pattern of high in the south and low in the north, with the midstream being superior to the upstream and downstream areas. The coordination degree has a significant positive spatial correlation, and an obvious high-high and low-low agglomeration characteristics are observed. The high-high agglomeration areas are mainly distributed in the middle reaches and downstream areas with high ESV and relatively high urbanization level, and the low-low agglomeration areas are mainly distributed in the upstream areas with low ESV. (3) The dominant barrier factors did not change significantly from 1995 to 2018; the ESV is dominated by regulating services, while the urbanization system is dominated by the economic and social subsystems. On the basis of these findings, the coupled and coordinated relationship between ESV and urbanization should be clarified and the impact of the urbanization process on ecosystem services and ecological security should be focused on for ensuring the overall quality and coordinated development of the Yellow River Basin.

Key words: ecosystem service value; urbanization; coupling and coordination; obstacle degree model; Yellow River Basin